

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

② Patentschrift  
⑪ DE 2922501 C2

⑦1 Aktenzeichen: P 29 22 501.2-33  
⑦2 Anmeldetag: 31. 5. 79  
⑦3 Offenlegungstag: 4. 12. 80  
⑦5 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 31. 3. 88

⑤1 Int. CL 4:  
G05D 3/00  
B 21 B 37/14  
H 02 P 5/06

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:

Licentia Patent-Verwaltungs-GmbH, 6000 Frankfurt,  
DE

⑦2 Erfinder:

Doering, Kurt, Dipl.-Ing., 1000 Berlin, DE

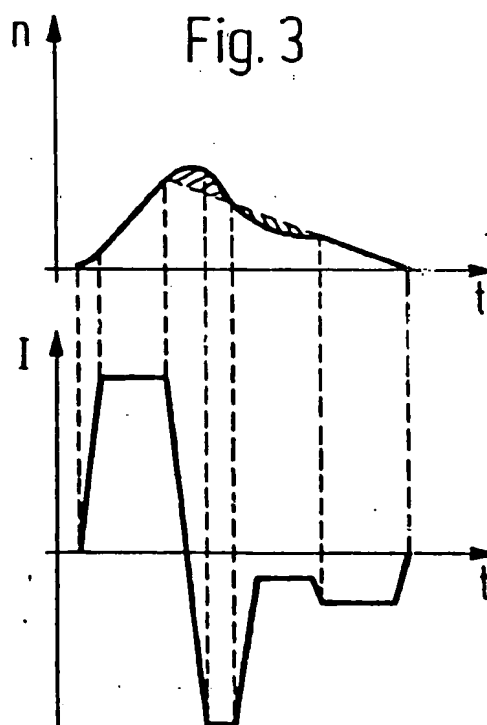
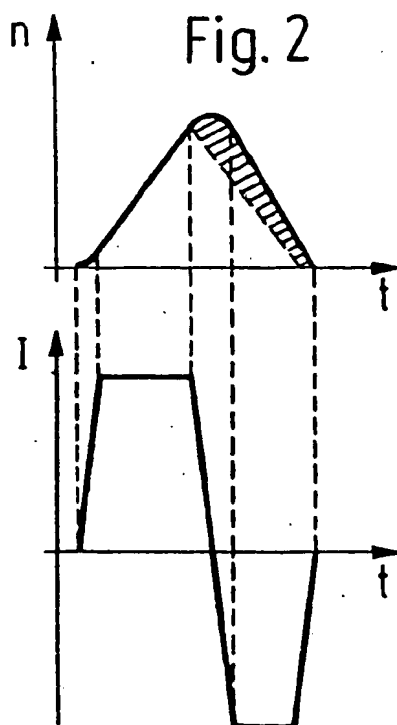
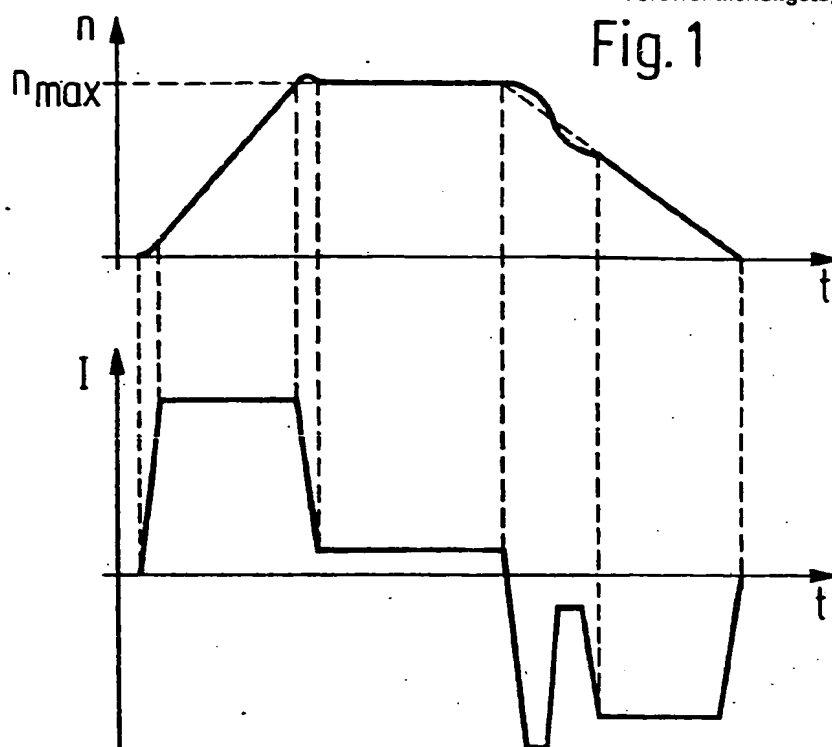
⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

AT 2 17 576  
AEG-Mitteilungen 54(1964) 11/12, Seiten 678-681;

⑤4 Verfahren und Einrichtung zur Lageregelung eines drehzahl- oder ankerspannungsgeregelten  
Gleichstromantriebes

DE 2922501 C2

DE 2922501 C2



## Patentansprüche

1. Verfahren zur Lageregelung von drehzahl- oder ankerspannungsgeregelter Gleichstromantriebe mit unterlagelter Stromregelung und mit einer Dimensionierung des Gleichstromantriebs gegebenen maximalen Verstärkung eines Lageregelkreises, dadurch gekennzeichnet, daß bei einem Verfahrensweg ( $s_1$ ), der kleiner ist als die Summe ( $s_2$ ) aus dem erforderlichen Beschleunigungsweg zum Fahren an die für den Antrieb zulässigen Stromgrenze bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit und dem Bremsweg zum Abbremsen von der Maximalgeschwindigkeit bis zum Stillstand in einer vorgegebenen Position, die maximale Verstärkung des Lageregelkreises nach der Beziehung

$$k_{max} \cdot \sqrt{\frac{s_1}{s_2}}$$

reduziert wird, wobei durch die reduzierte Verstärkung ( $k_r$ ) die vorgegebene maximale Verstärkung ( $k_{max}$ ) als oberer Grenzwert nicht überschritten und ein unterer Grenzwert gebildet durch die Summe aus der minimalen Verstärkung ( $k_0$ ) und einem lastabhängigen Verstärkungsanteil ( $k_L$ ), nicht unterschritten wird, wobei der Wurzelexponent ( $n$ ) einen Wert von 2 bis 3 besitzt, und die reduzierte und gegebenenfalls begrenzte Verstärkung ( $k_r$ ) dem Lageregelkreis beim Start des Gleichstromantriebs vorgegeben wird.

2. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die reduzierte Verstärkung ( $k_r$ ) in einem ersten Funktionsgeber (3) gebildet wird, dessen Eingang der Sollwert des Verfahrensweges (Lagesollwert  $s_1$ ) zugeführt ist, und der die minimale Verstärkung ( $k_0$ ), die maximale Verstärkung ( $k_{max}$ ), den lastabhängigen Verstärkungsanteil ( $k_L$ ), den Wurzelexponenten ( $n$ ) und die Summe ( $s_2$ ) aus Beschleunigungs- und Bremsweg als einstellbare Konstanten enthält.

3. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die reduzierte Verstärkung ( $k_r$ ) als Ausgangsgröße des ersten Funktionsgebers (3) auf den Verstärker (2) des Lageregelkreises wirkt.

4. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß dem Verstärker (2) ein zweiter Funktionsgeber (4) nachgeschaltet ist, der die vom Verstärker (2) gelieferte Regelabweichung  $\Delta$ , radiziert, wobei dem zweiten Funktionsgeber (4) ein Reduziervverstärker (4a) nachgeschaltet sein kann, auf den die reduzierte Verstärkung als reduzierte Ausgangsgröße  $\sqrt{k_r}$  des ersten Funktionsgebers (3) einwirkt.

5. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Funktionsgeber (3) die Funktion der reduzierten Verstärkung durch eine Stufenfunktion annähert.

6. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Funktionsgeber (3) die Funktion der reduzierten Verstärkung durch ein Polygon annähert.

7. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die

## Funktion der reduzierten Verstärkung mittels eines Digitalrechners ausgeführt wird.

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des vorliegenden Patentanspruchs 1, sowie auf eine Einrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens gemäß Patentanspruchs 2.

Lageregelungen in industriellen Anlagen sollen im allgemeinen zeitoptimal sein, d. h. es genügt nicht, die gewünschte Lage mit einem möglichst kleinen, höchstzulässigen Fehler anzufahren, sondern dies soll auch in der kürzestmöglichen Zeit geschehen. Dies gilt in besonderem Maße für die Walzenanstellung in Walzwerken. Als Antrieb wird üblicherweise ein stromrichter gespeister, fremderregter Gleichstrommotor verwendet.

Es ist durch die AT 2 17 576 ein Wegregler mit Drehzahl und Ankerstrom des Stellmotors als Hilfsregelgrößen in unterlagerten Regelkreisen bekanntgeworden, bei dem eine galvanische Gegenkopplung im Regelverstärker mit einem Schwellwertglied, das bei Überschreiten einer vorbestimmten Ausgangsspannung durch Überbrücken von Gegenkopplungswiderständen den Verstärkungsgrad des Regelverstärkers verringert. In dieser Schrift wird der Versuch beschrieben, die Bildung der Bremsparabel in einfacher Weise zu realisieren.

Bekannte Lageregelungen sind im allgemeinen nach dem Prinzip des sogenannten Stromleitverfahrens aufgebaut (AEG-Mitteilungen 54 (1964) 11/12, Seiten 678—681). Dabei wird die Differenz zwischen Lagesoll- und Lage-Istwert einem Lageregler zugeführt. Der Lageregler bildet in Abhängigkeit von dem vorhandenen Wegfehler den Drehzahlsollwert und der Drehzahlregler in Abhängigkeit von dem vorhandenen Drehzahlfehler den Stromsollwert. Es sind somit drei einander jeweils untergeordnete Regelkreise vorhanden. Der Stromregler beeinflusst dann beispielsweise ein Impulsgerät, welches die Zündimpulse für den Stromrichter liefert. Bei analogen Methoden zur Messung der Lage, z. B. mittels Potentiometer oder Drehmelder, wird die Differenz zwischen Lagesoll- und Lageistwert, also die Wegdifferenz  $\Delta$ , direkt vom System gebildet. Bei digitalen Verfahren kann im einfachsten Fall die Wegdifferenz durch einen Subtrahierer gebildet werden. Je nach der Aufgabenstellung kommt hierfür auch ein Rechengerät bzw. ein Prozeßrechner zum Einsatz.

Beim Zuschalten der Lageregelung, also zu dem Zeitpunkt, von dem ab sich der Antrieb von der augenblicklichen Lage in die neue, vorgegebene Lage bewegen soll, sind der Lageregler und der Drehzahlregler übersteuert, und nur der Stromregler ist führend, d. h. er führt den Ankerstrom an der für den Motor zulässigen Stromgrenze. Dies ist im Interesse der maximal möglichen Beschleunigung notwendig. Hat der Motor nach dem Hochlaufen seine maximale Drehzahl erreicht, so ist der Drehzahlregler nicht mehr übersteuert. Dadurch wird der Sollwert für den Stromregler so weit reduziert, daß der Motor nur noch den Strom führt, der für die Überwindung der Reibung unter Beibehaltung der Drehzahl erforderlich ist.

Ist die Differenz zwischen der Soll- und Istlage so klein geworden, daß die Bremsung des Antriebes einsetzen muß, geht auch der Lageregler aus dem Übersteuerungsbereich heraus. Der Drehzahlsollwert wird dann vom Lageregler so bis auf Null geführt, daß der Antrieb mit der vorgegebenen Genauigkeit in der richtigen Lage zu stehen kommt.

Bei dem bekannten Verfahren ist die Verstärkung im Lageregelkreis durch das Verhältnis von maximaler Geschwindigkeit zum Bremsweg bestimmt. Um eine ausreichende Regelreserve zur Verfügung zu haben, sollte der sich beim Bremsen einstellende Bremsstrom etwa 80% des zulässigen Grenzstromes betragen. Entsprechend ist die Verstärkung des Lageregelkreises einzustellen. Für lange Fahrwege ergibt sich dann ein Fahrverhalten mit trapezförmigen Drehzahlverlauf gemäß Fig. 1. Hat der Antrieb nach dem Start die maximale Drehzahl erreicht, klingt der Strom auf einen Wert ab, der zur Überwindung der Reibung erforderlich ist. Bei Beginn des Bremsvorgangs erreicht der Strom sehr schnell den negativen Bereich, in welchem er den Antrieb bremst. Während der Stromumkehr hat der Antrieb seine bisherige Drehzahl zu lange beibehalten, so daß der Strom zunächst bis an die Stromgrenze ansteigt und erst dann auf den vorgegebenen Wert absinkt.

Bei kurzen Fahrwegen dagegen erreicht der Antrieb nicht seine maximale Geschwindigkeit, sondern der Bremsbeginn fällt noch in die Beschleunigungsphase (sogen. Dreiecksbetrieb gemäß Fig. 2).

Bei Bremsbeginn führt der Strom noch seinen vollen Wert, der nur in einer endlichen Zeit zu Null gemacht werden kann. Während dieser Zeit wird der Antrieb aber noch weiter beschleunigt. Der Strom geht dann an die negative Stromgrenze, wegen des zu kurzen Restweges reicht die Verzögerung jedoch nicht aus, um den Antrieb rechtzeitig abzubremesen. In Fig. 2 ist die schraffierte Fläche ein Maß für den Weg, um den der Antrieb über sein Ziel hinausgefahren ist.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, mit dem bei kurzen Fahrwegen der Bremsbeginn keine Überschneidung mit der noch vorhandenen Beschleunigungsphase erfährt und somit eine große Genauigkeit für den Fahrweg erreicht wird.

Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung durch die im Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

Bevorzugte Ausführungsformen einer Einrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich durch die Merkmale der Ansprüche 2 bis 7.

Das Verfahren nach der Erfindung wird in der nachfolgenden Beschreibung anhand von in den Fig. 4 bis 8 der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen einer Einrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens näher erläutert.

Es zeigt

Fig. 1 den Verlauf von Drehzahl und Strom bei Vorgabe eines langen Fahrweges,

Fig. 2 den Verlauf von Drehzahl und Strom bei Vorgabe eines kurzen Fahrweges, wobei die Verstärkung der Lageregelung genauso groß ist wie für lange Fahrwege nach Fig. 1,

Fig. 3 den Verlauf von Drehzahl und Strom bei Vorgabe eines kurzen Fahrweges mit reduzierter Verstärkung des Lageregelkreises nach der Erfindung,

Fig. 4 das regelungstechnische Strukturbild einer Lageregelung nach der Erfindung,

Fig. 5 ein weiteres Ausführungsbeispiel nach der Erfindung,

Fig. 6 den wegababhängigen Verlauf der reduzierten Verstärkung  $k_r$ ,

Fig. 7 die Annäherung der Reduktionsfunktion durch eine Stufenfunktion,

Fig. 8 die Annäherung der Reduktionsfunktion durch Polygone I und II.

Fig. 3 zeigt gegenüber Fig. 1 und 2 den Vorteil der

Erfindung. Bei Bremsbeginn wird der Antrieb wegen der nur allmählichen Stromumkehr zunächst noch weiter beschleunigt. Wegen der reduzierten Verstärkung läßt sich jedoch der vorgegebene Drehzahlverlauf (gestrichelte Linie) im Mittel einhalten, da der Strom zu Beginn an der Stromgrenze verläuft und im folgenden eine ausreichende Regelreserve verbleibt.

In Fig. 4 dient als Antrieb zum Anfahren einer vorgegebenen Lage, Stellung oder Position ein fremderregter Gleichstrommotor  $M$ . Ein Tachometergenerator  $T$  liefert den Drehzahlwert  $n$  und eine Wegmeßeinrichtung  $S$  einen dem zurückgelegten Weg des Antriebs entsprechenden Lageistwert  $s$ . Die in einer Additionsstelle 1 aus dem vorgegebenen, dem Fahrweg entsprechenden Lagesollwert  $s_s$  und dem Lageistwert  $s$  gebildete Wegdifferenz  $\Delta s$  wird in einem Verstärker 2 verstärkt und auf den Regelsignalpegel begrenzt. Mit 3 ist ein Funktionsgeber bezeichnet, dessen Eingang der Lagesollwert  $s_s$  zugeführt ist und der die zur Überwindung der Haftreibung im Leerlauf erforderliche minimale Verstärkung  $k_0$  des Lageregelkreises, einen lastabhängigen Verstärkungsanteil  $k_L$  für das Verfahren des Antriebs unter Last, die durch die elektrische und mechanische Dimensionierung des Antriebs gegebene maximale Verstärkung  $k_{max}$  des Lageregelkreises, den Wurzelexponenten  $n$  und die Summe  $s_b$  aus dem Beschleunigungsweg, der beim Fahren an der für den Antrieb zulässigen Stromgrenze bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit erforderlich ist, und dem Bremsweg, der beim Abbremsen von der Maximalgeschwindigkeit bis zum Stillstand in der vorgegebenen Position erforderlich ist, als einstellbare Konstanten enthält. Aus diesen Größen berechnet der Funktionsgeber 3 beim Start des Antriebes den Verstärkungsgrad für den Verstärker 2 nach der Beziehung

$$k_0 + k_L \leq k_r = k_{max} \cdot \sqrt[n]{\frac{s_s}{s_b}} \leq k_{max},$$

wobei der Wurzelexponent  $n$  einen Wert von 2 ... 3 besitzt.

Ist der dem Fahrweg entsprechende Lagesollwert  $s_s$  gleich der Summe  $s_b$  aus erforderlichem Beschleunigungs- und Bremsweg, so ergibt der Wurzel Ausdruck den Wert 1 und der vorgegebene Verstärkungsgrad ist gleich  $k_{max}$ . Bei größeren Fahrwegen, d. h.  $s_s > s_b$ , beträgt die Verstärkung des Regelkreises wegen der Begrenzung der Ausgangsgröße des Funktionsgebers 3 ebenfalls  $k_{max}$ . Bei kleinen Fahrwegen, d. h.  $s_s < s_b$ , wird die Verstärkung nach der angegebenen Beziehung reduziert, wobei die reduzierte Verstärkung  $k_r$  einen durch die maximale Verstärkung  $k_{max}$  gegebenen oberen Grenzwert nicht überschreitet und einen unteren Grenzwert nicht unterschreitet, der beim Verfahren des Antriebes im Leerlauf durch die zur Überwindung der Haftreibung im Leerlauf erforderliche minimale Verstärkung  $k_0$  und beim Verfahren des Antriebes unter Last durch die Summe  $k_0 + k_L$  aus der minimalen Verstärkung  $k_0$  und einem lastabhängigen Verstärkungsanteil  $k_L$  gebildet wird. Die vom Funktionsgeber 3 berechnete und ggfs. nach oben oder unten begrenzte Verstärkung  $k_r$  wird der Lageregelung beim Start des Antriebes vorgegeben und bleibt während des jeweiligen Stellvorganges konstant.

Die in dem Verstärker 2 entsprechend der Berechnung des Funktionsgebers 3 verstärkte Regelabweichung  $\Delta s'$  wird einem weiteren Funktionsgeber 4 zuge-

führt, dessen Aufgabe sich aus der Beziehung zwischen dem jeweils noch zu verfahrenen Restweg  $\Delta s$  und der augenblicklichen Drehzahl  $n$  des Antriebes bei konstanter Verzögerung ergibt:

$$n \sim \sqrt{\Delta s}$$

d. h. um den Antrieb am Ende des Restwegs  $\Delta s$  zum Stillstand zu bringen, muß bei konstanter Verzögerung die Drehzahl  $n$  sich proportional zur Wurzel aus dem jeweiligen Restweg  $\Delta s$  verhalten. Der Funktionsgeber 4 realisiert diese Beziehung der bekannten Bremsparabel und liefert eine der Größe  $\sqrt{\Delta s}$  proportionale Ausgangsspannung.

Die den Drehzahlsollwert  $n_s$  darstellende Ausgangsspannung des Funktionsgebers 4 wird in einer Additionsstelle 5 mit dem Drehzahlstwert  $n$  verglichen. Aus der Regelabweichung bildet ein Drehzahlregler 6 einen Stromsollwert  $i_s$  für den unterlagerten Stromregelkreis. Der Stromsollwert  $i_s$  wird über einen Stromanstiegsbegrenzer 7 einer Additionsstelle 8 zugeführt und dort mit dem Stromistwert  $i$  verglichen. Bei einer Soll-Ist-Abweichung beeinflußt ein als PI-Regler dargestellter Stromregler 9 dann ein Impulsgerät 10, welches die Zündimpulse für einen den Antriebsmotor  $M$  speisenden Umkehrstromrichter 11 liefert.

Mit der einstellbaren Verstärkung  $k_{max}$  wird die von den Gegebenheiten der jeweiligen Anlage abhängige Lage des Bremsesetpunktes festgelegt. Hierbei wird die Verstärkung  $k_{max}$  zweckmäßigerweise so gewählt, daß der Antrieb mit dem maximal zulässigen Bremsstrom etwas zu früh zum Stillstand kommen würde, weil dieser Bremsstrom wohl vermindert, über die zulässige Stromgrenze hinaus aber nicht vergrößert werden darf. Die Ausgangsspannung  $\Delta s'$  hat oberhalb einer durch die Verstärkung im Verstärker 2 bestimmten Wegdifferenz  $\Delta s$  einen konstanten maximalen Wert. Wird dieser Wert nach Umformung in dem Funktionsgeber 4 dem hier als PI-Regler dargestellten, aber auch als P-Regler ausführbaren Drehzahlregler 6 als maximaler Drehzahlsollwert aufgeschaltet, dann steigt der Motorstrom so schnell an, wie es durch die Dimensionierung der Stromrichteranlage gegeben und mit Rücksicht auf die mechanische und elektrische Ausführung des Antriebes zulässig ist.

Bei dem in Fig. 5 gezeigten weiteren Ausführungsbeispiel nach der Erfindung wird die in der Additionsstelle 1 aus dem Lagesollwert  $s_s$  und dem Lageistwert  $s$  gebildete Wegdifferenz  $\Delta s$  in einem Verstärker 2a verstärkt, dessen Verstärkung im Gegensatz zu derjenigen des Verstärkers 2 in Fig. 4 konstantgehalten ist. Die in dem Verstärker 2a verstärkte und auf den Regelsignalpegel begrenzte Wegdifferenz  $\Delta s'$  wird dem Funktionsgeber 4 zugeführt, der ein der Größe

$$\sqrt{\Delta s'} = n_s'$$

entsprechendes Ausgangssignal an einen Reduzierverstärker 4a liefert, dessen Verstärkung von der Ausgangsspannung des Funktionsgebers 3 bestimmt wird. Gegenüber Fig. 4 liefert der Funktionsgeber 3 hier die radizierte Größe  $\sqrt{k_r}$  als Ausgangsspannung. Die den Drehzahlsollwert  $n_s$  darstellende Ausgangsspannung des Reduzierverstärkers 4a wird dann — wie in Fig. 4 — der Additionsstelle 5 zugeführt.

In den Fig. 6 bis 8 ist jeweils auf der Ordinate die auf die maximale Verstärkung  $k_{max}$  bezogene Verstärkung  $k_n$ ,  $k_0$  bzw.  $k_{max}$  und jeweils auf der Abszisse das Verhältnis aus dem zu verfahrenen Weg (Lagesollwert  $s_s$ ) zur

Summe  $s_b$  aus erforderlichem Beschleunigungs- und Bremsweg des Antriebs aufgetragen. Der Beginn der Reduktionsfunktion liegt hierbei jeweils bei einem angenommenen Wert der auf die maximale Verstärkung  $k_{max}$  bezogenen minimalen Verstärkung  $k_0$  von 0,3.

Fig. 6 zeigt den wegabhängigen Verlauf der reduzierten Verstärkung  $k_r$  nach der Erfindung.

Fig. 7 zeigt die Annäherung der Reduktionsfunktion durch eine Stufenfunktion. Eine solche Stufenfunktion läßt sich in bekannter Weise z. B. durch Komparatoren mit nachgeschaltetem Netzwerk erreichen.

Fig. 8 zeigt die Annäherung der Reduktionsfunktion durch Polygone I und II, die sich in bekannter Weise durch Dioden und Widerstände realisieren lassen.

Durch die Erfindung wird erreicht, daß herab bis zu einem kleinsten Weg, bei dem der Antrieb noch nicht überschwingt, der volle Drehzahlsollwert, dagegen bei noch kleineren zu verfahrenen Wegen nur ein entsprechend verminderter Drehzahlsollwert vorgegeben wird. D. h. bei kleinen Verfahrenswegen läuft der Antrieb zwar langsamer in die vorgegebene Lage ein, jedoch schnellstmöglich bei der jeweils geforderten Einlaufgenauigkeit. Damit verhält sich der Antrieb in allen Betriebsfällen zeitoptimal.

Die Ausführungsbeispiele zeigen die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Lageregelung eines drehzahlgeregelten Gleichstromantriebes. Es läßt sich mit gleichem Erfolg bei nur geringfügigen Änderungen auch zur Lageregelung von ankerspannungsgeregelten Gleichstromantrieben einsetzen. Die einzige Änderung besteht darin, daß der Additionsstelle 5 anstelle des Drehzahlstwertes  $n$  der Ankerspannungssollwert  $U_A$  des Gleichstrommotors zugeführt wird und die Ausgangsspannung des Verstärkers 2 nunmehr den Ankerspannungssollwert  $U_A$  darstellt. Der Regler 6 wird somit zum Ankerspannungsregler.

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

